

**МИНИСТЕРСТВО
ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное агентство
по образованию**

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**НОВОСИБИРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

физический факультет

**Квалификационная работа на соискание
степени бакалавра**

Кафедра физики плазмы

Макаров Александр Николаевич

Охлаждение литиевой нейтроногенерирующей мишени

Научный руководитель:

**к.ф.-м.н., доцент НГУ, снс ИЯФ СО РАН
Таскаев Сергей Юрьевич**

Новосибирск – 2007 год

Оглавление

Введение	3
Мишень диаметром 5 см с жидкометаллическим охлаждением	5
Мишень диаметром 10 см с параллельными каналами и водяным охлаждением	9
Мишень диаметром 10 см со спиралевидными каналами и водяным охлаждением	10
Расчет гидравлического сопротивления мишени.....	11
Гидравлические испытания мишени со спиралевидными каналами.....	13
Расчет спектра нейтронов.....	16
Конусная мишень с винтовыми каналами	17
Заключение	20
Список литературы.....	21

Введение

Концепция нейтронозахватной терапии рака была предложена в 1936 году [1], спустя 4 года после открытия нейтрона. Раствор, содержащий стабильный изотоп бор-10, вводят в кровь человека и через некоторое время бор сорбируется в клетках. Затем опухоль облучают потоком эпитепловых нейтронов. В результате поглощения нейтрона стабильным изотопом ^{10}B происходит ядерная реакция $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ (Рис. 1), и образующиеся энергичные α -частица и ион ^7Li быстро тормозятся и выделяют энергию $\sim 2,3$ МэВ в пределах именно той клетки, которая содержала ядро бора, что приводит к её поражению. Т.о., если обеспечить более высокую концентрацию ^{10}B в раковой клетке по сравнению со здоровой, то бор-нейтронозахватная терапия (БНЗТ) позволит осуществить избирательное поражение клеток злокачественных опухолей.

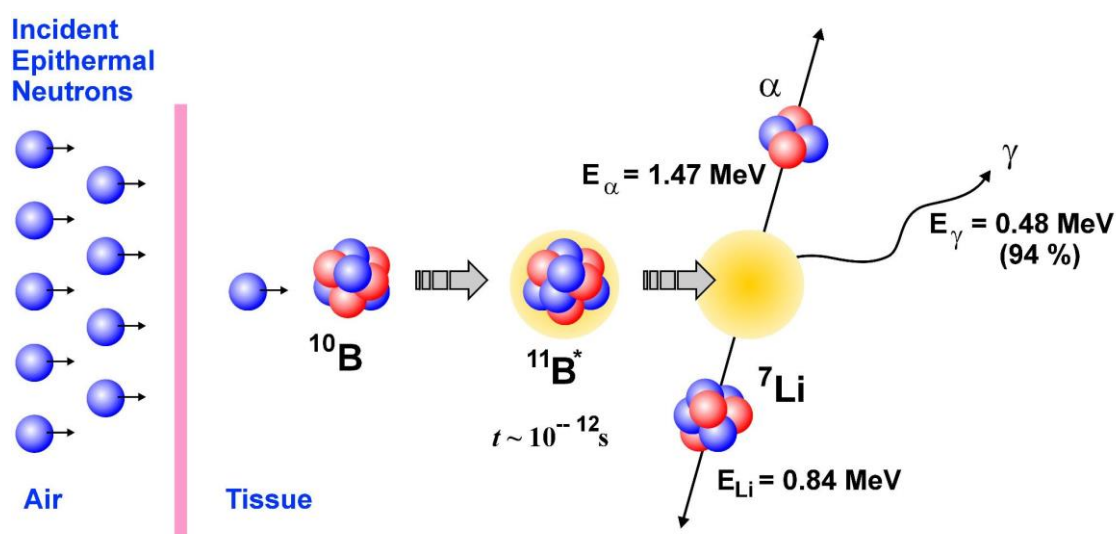


Рис. 1. Схематическое изображение ядерной реакции в результате захвата нейтрона ядром бора.

В настоящее время в Институте ядерной физики сооружается пилотный вариант источника для БНЗТ [2]. Генерация нейтронов осуществляется при попадании протонного пучка с энергией 2-2,5 МэВ и током до 10 мА на литий в результате пороговой реакции $^7\text{Li}(p,n)^7\text{Be}$. Литиевая нейтронообразующая мишень является одним из основных и сложных элементов установки, поскольку должна удовлетворять ряду критериев, порой взаимоисключающих:

- 1) для нейтронозахватной терапии идеален энергетический спектр, в котором отсутствуют нейтроны с энергией ниже 0,5 эВ и выше 10 кэВ. Важно и отсутствие γ -излучения;
- 2) реакция ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ является наилучшей для генерации тепловых нейтронов, однако литий имеет низкую температуру плавления, плохую теплопроводность и высокую химическую активность;
- 3) каждый акт рождения нейтрона в результате реакции ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ сопровождается появлением радиоактивного ядра изотопа бериллия. Генерация нейтронов в течение нескольких часов уже может приводить к наведенной активности, препятствующей простому обращению с мишенью;
- 4) неупругое рассеяние протонов на ядрах лития приводит к излучению γ -квантов энергией 0,477 МэВ. В случае, если протоны полностью поглощаются в слое лития, поток γ -квантов сравним с потоком нейтронов и, даже, может его превосходить. Существенного понижения этого паразитного потока γ -квантов можно достичь созданием литиевого слоя такой толщины, чтобы при прохождении этого слоя энергия протонов уменьшалась только до 1,882 МэВ – энергии порога реакции генерации нейтронов. Дальнейшее поглощение протонов должно осуществляться в веществе, в котором неупругое рассеяние протонов не приводит к излучению γ -квантов;
- 5) при имплантации 2 МэВ-ных протонов в твердые тела поверхностный слой может деформироваться вплоть до образования блистеров и отслаивания чешуек [3, 4]. Появление развитой поверхности мишени может не только приводить к усиленному испарению лития из-за уменьшения теплопроводности, но и вообще делать мишень непригодной. Оцениваемая доза по блистерингу достигается за время, сравнимое со временем планируемого облучения (около 10 мин);
- б) чистый литий более эффективен для генерации нейтронов по сравнению с гидридом, оксидом, нитридом или фторидом лития, обладает более высоким коэффициентом теплопроводности, однако имеет несравненно меньшую температуру плавления и потому требует эффективного теплоотвода при желательной более низкой температуре литиевого слоя. Возможно использование мишени с жидким литиевым слоем, однако существенное испарение лития повлечет за собой не только снижение высоковольтной электрической прочности ускорителя из-за поступления паров лития, но и распространение возникающего радиоактивного изотопа бериллия по всей установке.

7) мощность, выделяющаяся в мишени, составляет 20 кВт, поэтому для поддержания лития в твердом состоянии охлаждение должно быть достаточно интенсивным.

После проведения расчетов и тепловых испытаний на прототипах мишени было определено, что оптимальной мишенью источника эпитепловых нейтронов является легко заменяемая тонкая неподвижная мишень, на которую со стороны протонного пучка нанесен тонкий слой чистого лития, а обратная сторона мишени интенсивно охлаждается водой.

Данная работа посвящена выбору и оптимизации системы охлаждения мишени с учетом ее влияния на спектр генерируемых нейтронов и простоты замены мишени. Сначала описываются концепции ранее разработанных систем охлаждения мишени и результаты ряда проведенных экспериментов. Затем в работе приводятся результаты гидравлических испытаний мишени, результаты расчета поглощенной дозы в фантоме для мишени со спиралевидными каналами и предлагается новый улучшенный вариант мишени в виде конуса с винтовыми каналами.

Мишень диаметром 5 см с жидкометаллическим охлаждением

В начале разработки ускорительного источника нейтронов [2] предполагали конструкцию мишени в виде диска диаметром 5 см, с которой необходимо снимать 25 кВт тепловой мощности. Использование воды для снятия более 1 кВт/см² практически невозможно, поэтому было предложено использовать жидкий металл (галлий) для охлаждения мишени. Была разработана, подготовлена и испытана система жидкометаллического охлаждения, состоящая из насоса для прокачки жидкого галлия, жидкометаллического контура с коммутационными устройствами, теплообменника и измерителя скорости металла и распределения давления. Мишень (рис. 2) представляла собой молибденовый диск толщиной 0,2 мм диаметром 64 мм, приваренный диффузионной сваркой к ребрам диска из стали АРМКО [5]. В этом стальном диске сделаны 10 параллельных каналов глубиной 1 мм и шириной 3,5 мм.



Рис. 2. Мишень с жидкометаллическим охлаждением.

Были проведены тепловые испытания мишени с жидкометаллическим и водяным охлаждением, нагреваемой электронным пучком ускорителя ЭЛВ (20 кВт 1,4 МэВ). В ходе этих экспериментов было выяснено [6], что турбулентный поток воды обеспечивает теплосъем до 650 Вт см^{-2} , а использование жидкометаллического охлаждения привело к разрушению мишени (рис. 3) вследствие значительной химической активности галлия, что указывает на отсутствие химической стойкости стали АРМКО к галлию при высокой температуре.



Рис. 3. Фотографии мишени с вытекшим на поверхность галлием через образовавшееся отверстие (слева) и стального диска с каналами для охлаждения после удаления молибденовой фольги.

Стало очевидно, что использование жидкометаллического охлаждения требует дальнейшего развития в поиске материалов стойких к горячему галлию не только для мишени, но и для насоса.

Другим выходом из создавшейся ситуации могло бы быть использование воды в случае уменьшения плотности мощности тепла. На рис. 4 представлена зависимость температуры поверхности мишени от скорости теплоносителя [11] для мишеней диаметром 5 и 10 см. Видно, что мишень диаметром 10 см позволит использовать в

качестве теплоносителя не только галлий, но и воду, и охлаждать мишень до температуры ниже температуры плавления лития при разумных скоростях течения теплоносителя порядка 10 м/с.

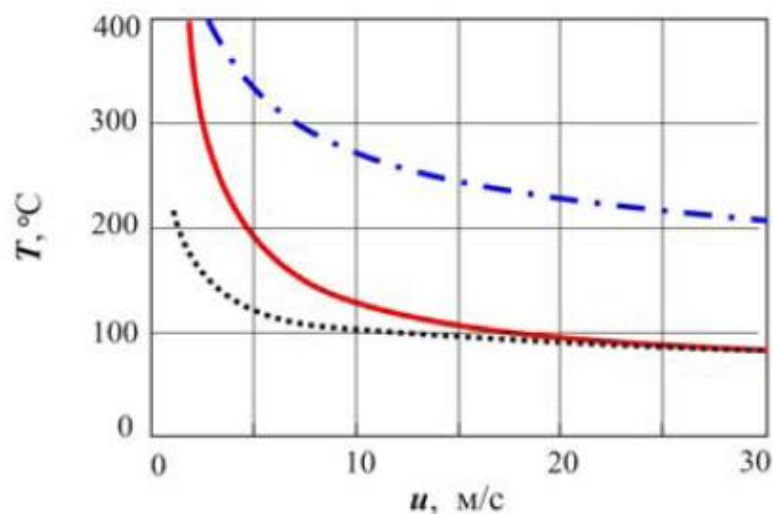


Рис. 4. Зависимость температуры поверхности мишени T от скорости теплоносителя u при плотности потока тепла 1272 Вт см^{-2} и охлаждении галлием с начальной температурой $40 \text{ }^\circ\text{C}$ (верхняя кривая), и при плотности потока тепла 318 Вт см^{-2} и охлаждении водой с начальной температурой $30 \text{ }^\circ\text{C}$ (сплошная линия) или галлием (пунктирная).

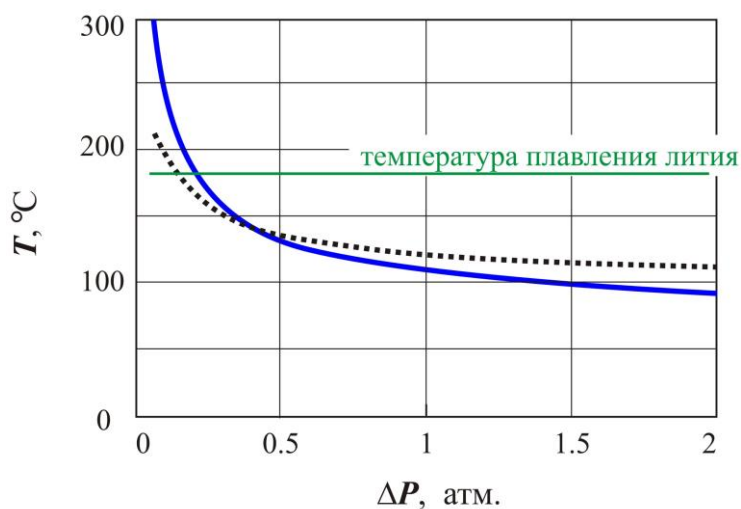


Рис. 5. Зависимость температуры поверхности мишени T от перепада давления ΔP при охлаждении водой с начальной температурой $30 \text{ }^\circ\text{C}$ (сплошная линия) и галлием с начальной температурой $40 \text{ }^\circ\text{C}$ (пунктирная) при плотности потока тепла 318 Вт см^{-2} .

Поскольку плотность галлия в 6 раз больше плотности воды, то для достижения такой же скорости течения галлия требуется приложить давление примерно в 5 раз большее (линейная зависимость давления от плотности ослабляется тем, что коэффициент трения галлия меньше коэффициента трения воды из-за меньшей вязкости). Так, скорость течения 10 м/с обеспечивается перепадом давления 0,8 атм. для воды и 4,5 атм. для галлия. На рис. 5 видно, что использование воды становится предпочтительнее для охлаждения мишени при увеличении перепада давления.

В режиме генерации нейтронов при энергии протонов 2,5 МэВ увеличение диаметра мишени с 5 до 10 см практически не сказывается на дозовом распределении, поскольку терапевтический пучок формируется замедлителем/отражателем размером порядка 1 м. Однако в припороговом режиме генерации это может приводить к уменьшению мощности дозы и, возможно, к изменению соотношений между дозами.

В припороговом режиме генерации нейтронов на оси пучка была определена биологически-взвешенная мощность дозы реакции $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ в опухоли и доза протонов отдачи в тканеэквивалентном фантоме: при энергии протонов 1,885 МэВ, диаметре мишени 2, 6 и 10 см и расстоянии мишень—фантом 2,5 см [8], и при энергии протонов 1,910 МэВ, диаметре мишени от 2 см до 12 см и расстоянии мишень—фантом 10 см.

Определено, что увеличение диаметра мишени эффективно подавляет дозу протонов отдачи на поверхности фантома при незначительном уменьшении терапевтической дозы от реакции $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ внутри него. Так, при энергии протонов 1,91 МэВ, увеличение диаметра мишени с 5 до 10 см приводит к уменьшению дозы протонов отдачи на 25 % на поверхности фантома. В то время как терапевтическая доза уменьшается на 12 %. Поскольку доза протонов отдачи на поверхности больше терапевтической, следовательно, для терапии необходима установка фильтра между источником нейтронов и пациентом для уменьшения эффекта от быстрых нейтронов. Таким тонким фильтром, замедляющим нейтроны, генерируемые в припороговом режиме, может быть слой воды. Поскольку с увеличением диаметра мишени отношение дозы протонов отдачи к терапевтической дозе уменьшается, то и толщина этого фильтра может быть уменьшена, что приведет к относительно меньшим потерям в потоке нейтронов. Так, в случае мишени диаметром 10 см слой воды толщиной 2,5 см понижает на 60 % дозу протонов отдачи на поверхности фантома, практически не изменяя максимальную терапевтическую дозу (происходит смещение максимума дозы ближе к поверхности) и делает приемлемым для терапии данную геометрию.

Определено, что использование мишени диаметром 10 см более выгодно по сравнению с мишенью диаметром 5 см и с точки зрения спектра нейтронов и поглощенной дозы.

Мишень диаметром 10 см с параллельными каналами и водяным охлаждением

Следующий изготовленный вариант мишени представлен на рис. 6. Приемником пучка являлся вольфрамовый диск толщиной 3 мм диаметром 80 мм с 13-ю расположенными параллельно с шагом 3,7 мм прямоугольными каналами для охлаждения размером 2 мм × 3 мм, изготовленными электроискровым способом.

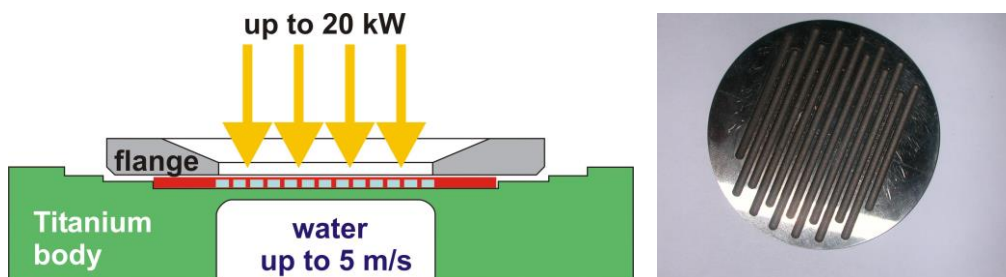


Рис. 6. Литиевая мишень с водяным охлаждением

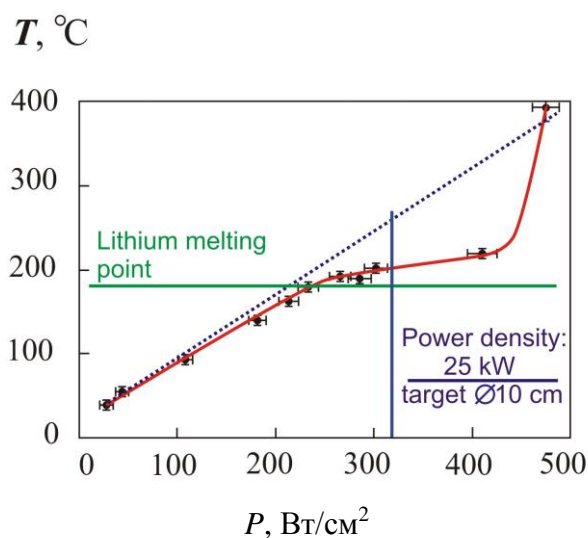


Рис. 7. Зависимость температуры поверхности мишени T от плотности мощности нагрева q при скорости охлаждающей воды 3 м/с: сплошная линия – экспериментально измеренная, пунктирная – расчетная для турбулентного течения без закипания.

Были проведены тепловые испытания мишени при нагреве омическим нагревателем мощностью до 20 кВт [7]. Результаты эксперимента представлены на рис. 7. На экспериментально измеренной кривой видны 3 режима теплосъема: i) до 250 Wt/cm^2 – турбулентное течение воды без закипания, которое хорошо согласуется с расчетом, ii) 250 Wt/cm^2 до 400 Wt/cm^2 – турбулентное течение воды с пузырьковым кипением, когда температура практически не растет, и iii) свыше 450 Wt/cm^2 – турбулентное течение воды с

пленочным кипением, когда происходит срыв теплосъема и температура начинает резко расти.

Конечно, теплосъем с пузырьковым кипением более эффективен, однако для получения более низкой температуры и из соображений безопасности рабочим режимом охлаждения следует выбрать режим охлаждения турбулентным потоком воды без закипания. Случайный локальный перегрев может привести к пузырьковому кипению, но это не даст значительного повышения температуры. Также достаточно протяженное по мощности плато, соответствующее пузырьковому кипению, обеспечивает почти двукратный запас до той мощности нагрева, при которой возможен срыв теплосъема и нежелательное разрушение мишени.

Видно, что скорости воды 3 м/с в каналах недостаточно для охлаждения поверхности в турбулентном режиме. Расчеты дают 10 м/с как оптимальное значение скорости. Данная конструкция мишени с параллельными каналами с имеющейся системой охлаждающей воды не могла обеспечить необходимую скорость 10 м/с. При такой скорости течения любые резкие повороты течения воды приводят к возникновению перепада давления порядка 0,5 атм. В данной мишени было несколько мест резких изменений направления течения воды, из-за чего перепад давления в подводящей системе был в несколько раз больше перепада давления в охлаждающих каналах (канал, где непосредственно происходит теплосъем с нагретой поверхности мишени). Т.е. с точки зрения использования давления мишень оказалась неэффективной, поскольку основное падение давления приходилось на подводящие каналы, а не на обеспечение необходимой скорости в каналах охлаждения. Также увеличение давления на входе в качестве решения проблемы оказалось невозможным, т.к. при этом происходила значительная деформация диска.

Мишень диаметром 10 см со спиралевидными каналами и водяным охлаждением

Конструкция диска с каналами спиралевидной формы (рис. 8) была предложена после проведения испытаний мишени с прямыми каналами. Проведенные расчеты показали, что плавная изогнутая форма каналов и отсутствие резких поворотов в подводящей системе позволяют значительно снизить гидравлическое сопротивление и тем самым уменьшить перепад давления на мишени. Так же было учтено, что важно минимизировать не только перепад давления на мишени, но и общее давление в охлаждающей системе.

Для оптимизации охлаждающей системы, как с параллельными каналами, так и с рассмотренными ниже спиралевидными, автором проводились расчеты сопротивления при течении воды в каналах охлаждения и подводящей системы.

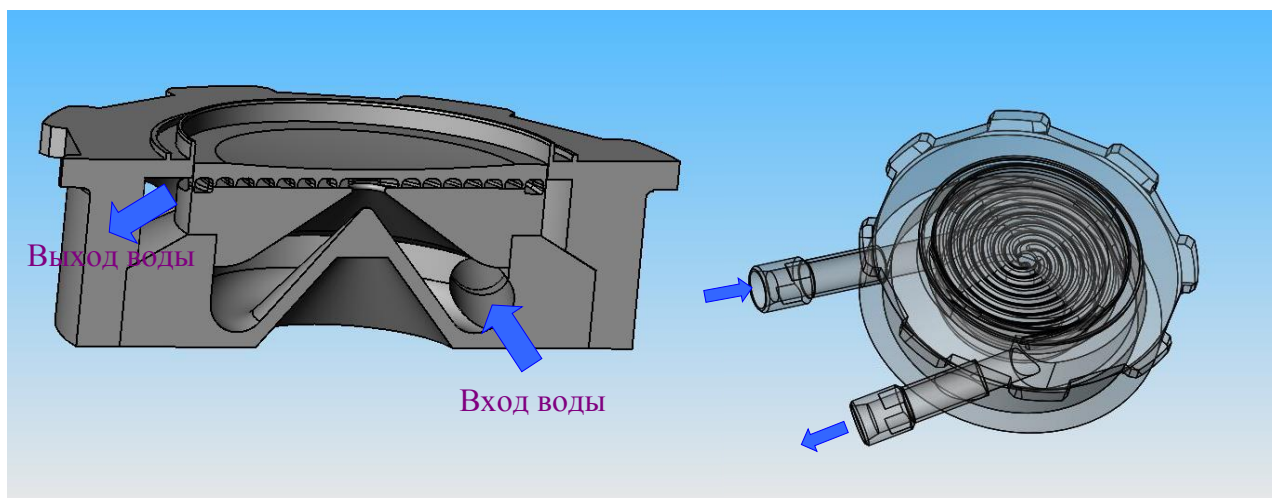


Рис. 8. Мишень с каналами спиралевидной формы

Расчет гидравлического сопротивления мишени

В данной главе описан расчет гидравлических параметров мишени со спиралевидными каналами и проведено сравнение этих параметров с реальными данными, полученными в ходе экспериментов.

При установившемся изотермическом течении падение давления выражается формулой Дерси:

$$\Delta P = \xi \frac{\rho u^2}{2},$$

где ξ – коэффициент сопротивления трения, ρ – плотность.

$$\xi = \xi_m + \xi_{tr},$$

где $\xi_{tr} = \lambda \frac{l}{d}$ – коэффициент трения прямой трубки, а ξ_m – местный коэффициент трения,

l – длина трубы, d – диаметр круглой трубы или гидравлический диаметр не круглого канала ($d_r = 4 S/\Pi$, где S – площадь сечения канала, Π – периметр канала), λ – коэффициент трения единицы длины ($\sim 0,003$).

Помимо перепада давления, вызванного трением, существуют еще и перепады давления из-за входов в каналы, внезапным расширением сечения канала, поворота течения, слиянием или разделением течения и т.п. [9], выражаемые через коэффициенты местных гидравлических сопротивлений ξ_m . Для изогнутой трубки:

$$\xi_m = ABC$$

$$A = 0,7\left(1 + \frac{\Delta}{\pi}\right) \quad B = \frac{0,21}{\sqrt{R/d}} \quad C = 0,85 + \frac{0,125}{a/b} \quad (\text{для } a/b < 4),$$

где Δ - угол поворота, R – радиус кривизны; b – большая сторона, a – малая сторона в сечении канала.

С целью выяснения соответствия расчетных данных с экспериментальными для внесения возможных эмпирических поправок в расчет были проведены эксперименты с медными трубками с внутренним диаметром 4 мм и длиной 1 м. При перепаде давления 2 атм. на прямой трубке расход воды составлял 0,4 л/мин, что хорошо согласуется с расчетом. Закругление трубки уменьшало расход. Так, при радиусе закругления 6 см расход уменьшился на 14 %. Следовательно, при постоянном давлении коэффициент сопротивления трения изогнутой трубки увеличивался на 29 % (с 9,5 до 12,3), что приводило к уменьшению скорости течения на 14 %. Если считать, что увеличение коэффициента сопротивления трения с 9,5 до 12,3 обеспечивается местным коэффициентом трения за счет изгиба, то выясняется, что экспериментально определенный таким образом местный коэффициент трения в несколько раз превосходит расчетный. В среднем, для разных радиусов закругления это превосходство составляет величину от 4 до 6. Конечно, свой вклад в увеличение сопротивления вносит не только закругленность каналов, но и изменение формы канала при деформации, но этот фактор сложно учесть. Поэтому для дальнейших расчетов модели спирали использовался коэффициент сопротивления $\xi = \xi_{tr} + 4 \xi_m$. Следует обратить внимание на то, что неопределенность в выборе этой эмпирической поправки не критична, поскольку расчетный коэффициент местного сопротивления на порядок меньше расчетного коэффициента сопротивления прямой трубки.

$$\text{Для спирали коэффициент местного сопротивления } \xi_m = \frac{\int_0^{\Delta} (1 + \Delta) \frac{0,2}{\sqrt{\frac{R(\alpha)}{d}}} d\alpha}{\Delta}, \text{ где}$$

$R(\alpha) = R_0 + dR\alpha$, где R_0 (7 мм) – начальный радиус кривизны, dR (4 мм/рад) – изменение радиуса кривизны за поворот на 1 рад, Δ (12,7 рад) - угол закрученности спирали.

Подставляя значения в формулы, получим, что для 4-х спиралей сечением 6×3 мм на мишени диаметром 120 мм: $\xi_{tr} = 2,8$, $\xi_m = 0,3$, $\xi = 4$. При скорости течения воды $u = 10$ м/с, падение давления на спирали составит $P = 2$ атм., расход $Q = 2,6$ м³/час. Расчетный нагрев воды при прохождении через мишень составит 8 °С [11].

Гидравлические испытания мишени со спиралевидными каналами

Мишень со спиралевидными каналами была изготовлена (рис. 9) и испытана. Приемником пучка является медный диск диаметром 120 мм с 4-мя двухоборотными спиралями сечением 6×3 мм с толщиной стенок между ними 1 мм. Диск изготовлен на фрезерном станке с числовым программным управлением. Корпус мишени сделан из нержавеющей стали.



Рис.9. Фотографии собранной мишени без приемника пучка (слева) и медного диска со стороны охлаждаемой водой.

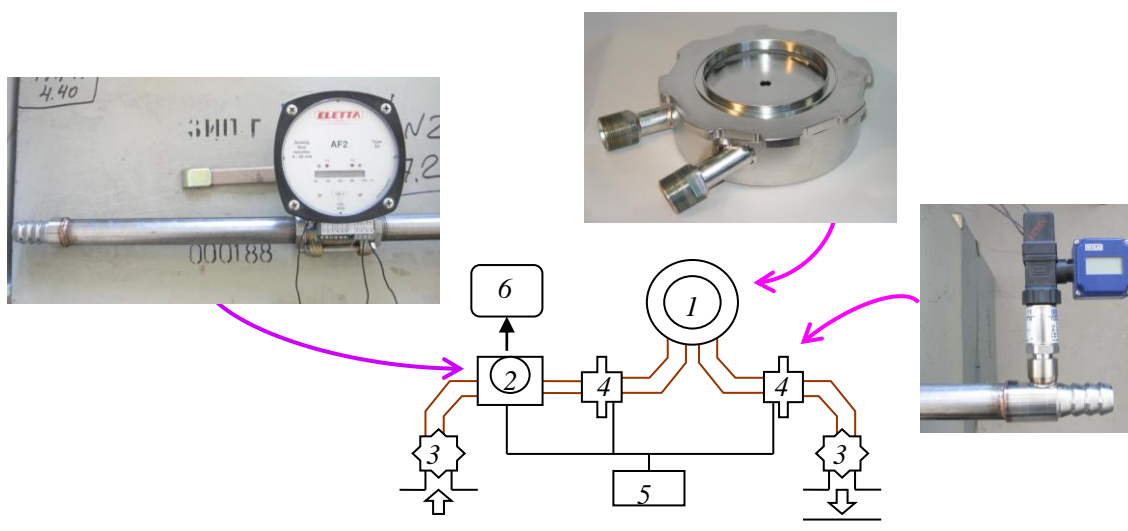


Рис. 10. Схема системы охлаждения. 1 – литевая мишень, 2 – расходомер, 3 – входной и выходной вентили, 4 – датчики давления, 5 – источник питания, 6 - осциллограф.

Для выяснения возможности обеспечения необходимой скорости 10 м/с в каналах охлаждения и соответствия расчетам была измерена зависимость перепада давления на мишени от расхода воды. К мишени был присоединен расходомер Eletta AF2 и два

датчика давления WIKA B12. Схема подсоединения представлена на рис. 10. Используемая система дистиллированной воды позволяла обеспечить давление до 4 атм.

Проверка расчетных данных была осуществлена в два этапа. Сначала было учтено влияние подводящих трубок и измерительных приборов (расходомера и датчиков давления) на величину перепада давления. Для этого из системы охлаждения была убрана литиевая мишень. Полученные результаты представлены на рис.11. Видна плавная зависимость давления от расхода.

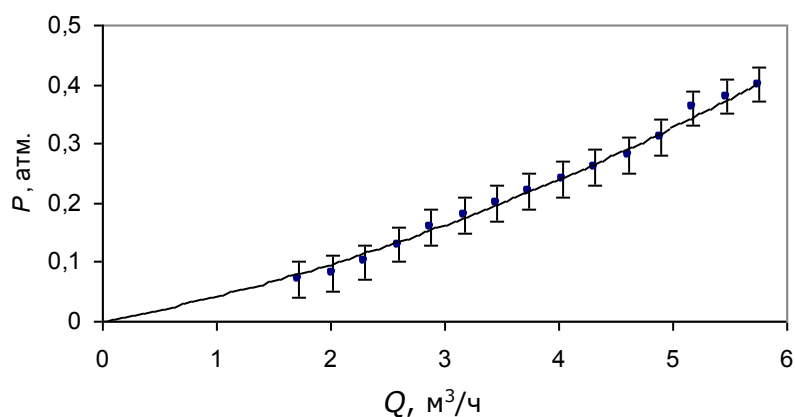


Рис. 11. Зависимость давления от расхода в подводящей системе (мишень убрана).

Затем была измерена общая зависимость давления от расхода в системе охлаждения с мишенью. Она показана на рис. 12. Видно, что характерная квадратичная зависимость с началом в нуле в данном случае нарушается. Это явление можно объяснить кризисом сопротивления [10], который возникает при числах Рейнольдса порядка 10^5 , и связан с турбулизацией пограничного слоя жидкости при обтекании препятствий. Турбулизация приводит к заметному смещению линий отрыва вниз по течению жидкости, в результате чего сила сопротивления уменьшается.

Результатирующая кривая, отображающая зависимость перепада давления от расхода непосредственно на мишени, получена вычитанием значений давления в системе охлаждения без мишени из значений давления в системе охлаждения с мишенью при соответствующих величинах расхода. Она показана на рис. 13 в сравнении с рассчитанной зависимостью.

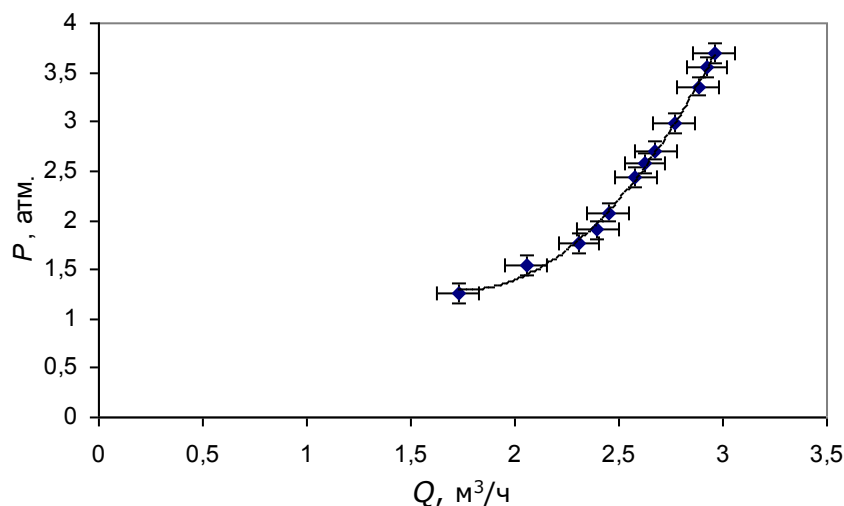


Рис. 12. Полная зависимость давления от расхода.

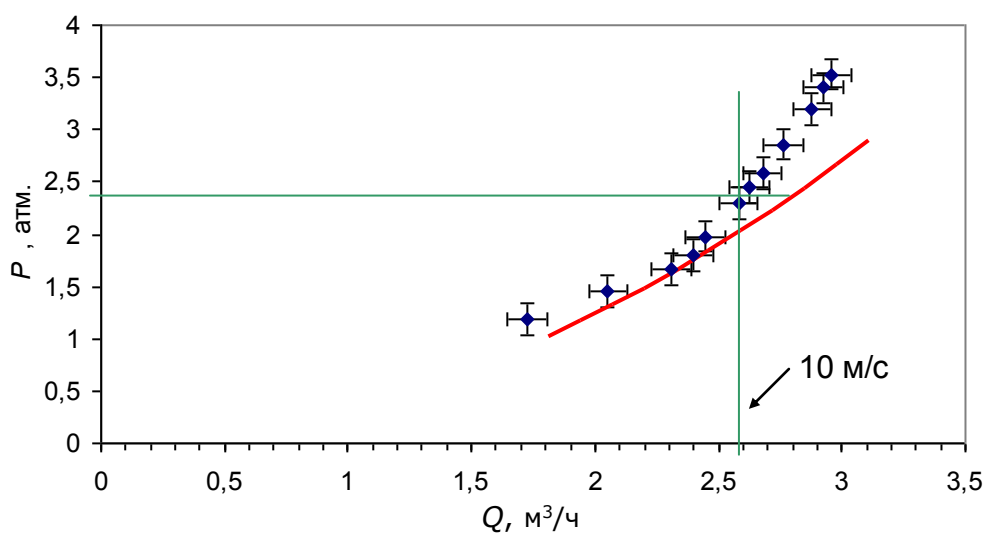


Рис. 13. Зависимость перепада давления P на мишени от расхода Q : точками показаны измеренные значения перепада давления на мишени, сплошной линией – расчет для спиралевидных каналов.

Видно, что измеренный перепад давления в охлаждающих каналах мишени и в каналах подводящей системы мишени немного превышает расчетный перепад давления в охлаждающих каналах. Это говорит, во-первых, о том, что перепад давления в подводящей системе минимизирован, и, во-вторых, расчет позволяет хорошо прогнозировать перепад давления в каналах охлаждения. На точность измерений в основном оказали влияние измерительные приборы – расходомер, датчики давления и осциллограф.

Таким образом определено, что данная конструкция мишени обеспечивает необходимую скорость течения воды в каналах при минимальном перепаде давления в подводящей системе, т.е. обеспечивает эффективный теплосъем при эффективном использовании имеющейся системы охлаждения дистиллированной водой.

Расчет спектра нейтронов

В случае использования мишени со спиральными каналами была посчитана поглощенная доза в фантоме и определена применимость получаемого нейтронного пучка для БНЗТ. Расчеты проведены Жерардом Бенжуа, аспирантом Университета Киото (Япония) методом MCNPX.

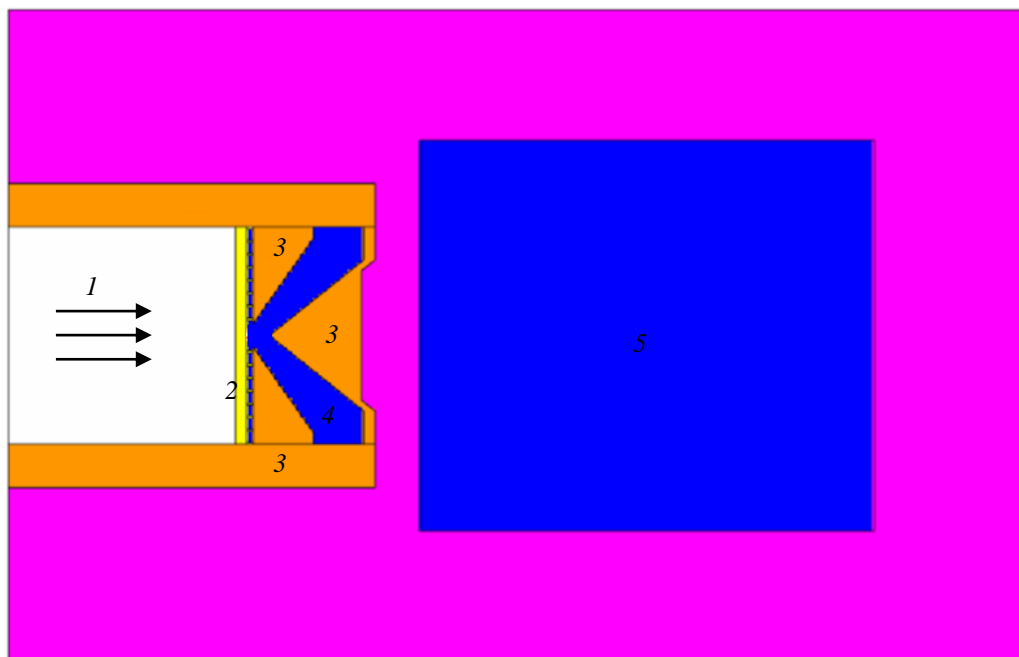


Рис. 14. Схема расположения мишени и фантома: 1 – пучок протонов, 2 – литиевый слой, 3 – металл корпуса мишени, 4 – вода системы охлаждения, 5 – тканезквивалентный фантом.

На рис. 14 представлена схема расположения нейтроногенерирующей мишени и фантома. Видно, что поток нейтронов, прежде чем попасть в фантом, проходит через слой воды в охлаждающей системе мишени и через металл корпуса мишени. Эти препятствия изменяют начальный спектр нейтронов. На рис. 15 приведены расчетные глубинные распределения по оси фантома дозы в результате распада бора, поглотившего нейтрон, в здоровой ткани и в опухоли, и дозы от γ -излучения. В первом случае используется разработанная мишень. Видно, что доза γ -излучения превышает эффективную дозу тяжелых частиц. Это происходит из-за взаимодействия нейтронов с водой из системы охлаждения и нержавеющей сталью, из которой сделан корпус мишени. Избыточное γ -излучение возникает в результате реакции $\text{H}(n,\gamma)\text{D}$ и реакций захвата нейтрона атомом железа. Во втором случае нержавеющая сталь заменена вольфрамом, поглощающим γ -излучение, вода заменена тяжелой водой (D_2O), установлен 1 см замедлитель из полимера C_2H_4 и подобрана оптимальная толщина литиевого слоя. Видно, что в результате этих изменений доза γ -излучения сократилась более чем в 2 раза.

Определено, что более приемлемой мишенью будет являться конструкция с меньшим количеством воды и с меньшим количеством нержавеющей стали на пути нейтронного потока. В то же время, уже данная мишень обеспечивает вполне приемлемое время терапии (20 Гр за 2,5 часа для тока пучка 10 мА).

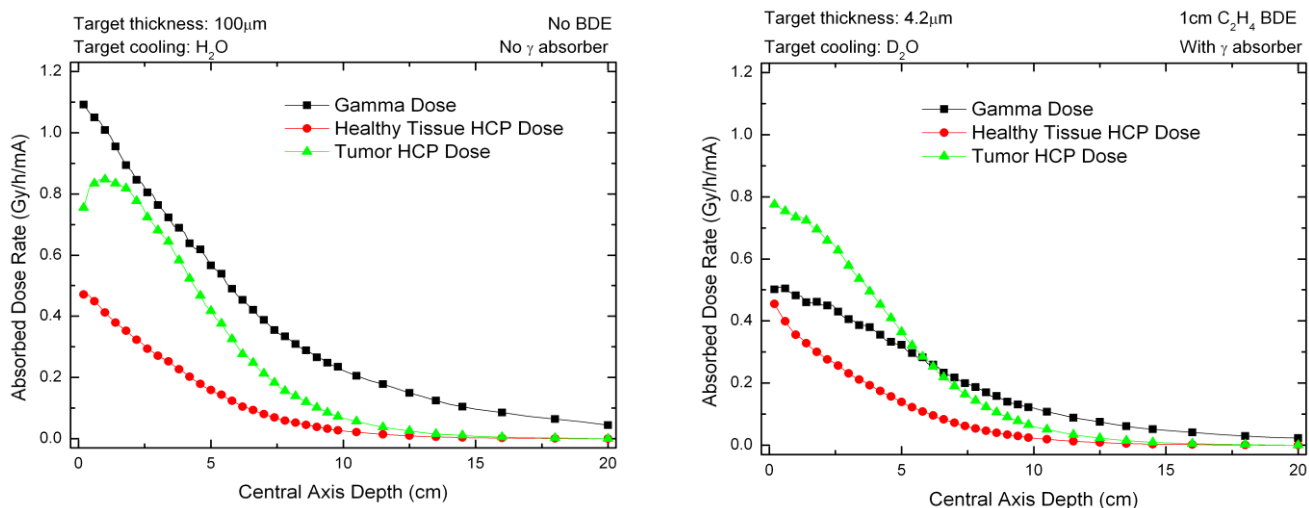


Рис. 15. Глубинное распределение доз при использовании разработанной мишени (слева) и при проведении ряда изменений для этой мишени.

Конусная мишень с винтовыми каналами

Новый вариант мишени предполагает конструкцию в виде конуса с 4-мя винтовыми каналами высотой 40 мм и основанием диаметром 10 см (см. рис. 16). Такая форма позволит значительно сократить дозу γ -излучения за счет уменьшения слоя воды между потоком нейтронов и фантомом и за счет сокращения количества используемого металла. Также принципиальное отличие состоит в использовании цельной медной трубки в качестве канала охлаждения, что позволит в несколько раз увеличить перепад давления на мишени без деформации конструкции. Напыление лития предполагается производить непосредственно на медную трубку, без использования подложки, благодаря чему повысится эффективность теплосъема и упростится конструкция мишени.

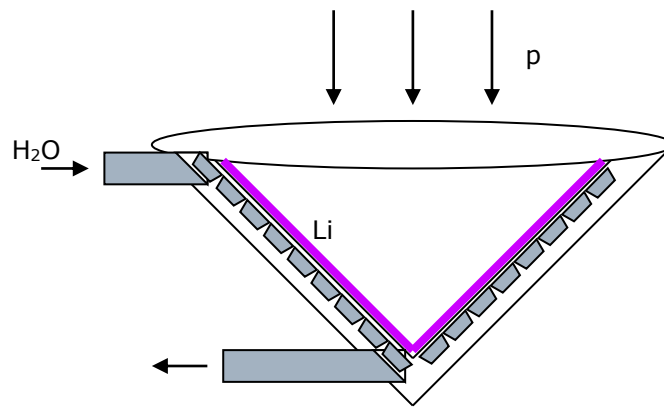


Рис. 16. Конусная мишень



Рис. 17. Модель винтообразного канала охлаждения (слева) и она же в сравнении с прямой трубкой такой же длины

Для того, чтобы рассчитать перепад давления и предполагаемый расход воды в мишени была создана модель одного винтообразного канала охлаждения в виде медной трубки круглого сечения длиной 57 см с внутренним диаметром 4 мм, закрученной в виде поднимающейся на 40 мм двухоборотной спирали с диаметром закругления от 10 см до 2,5 см (рис. 17). Схема эксперимента аналогична схеме эксперимента на мишени со спиралевидными каналами (рис. 10).

Результаты измерения зависимости давления от расхода представлены на рис. 18.

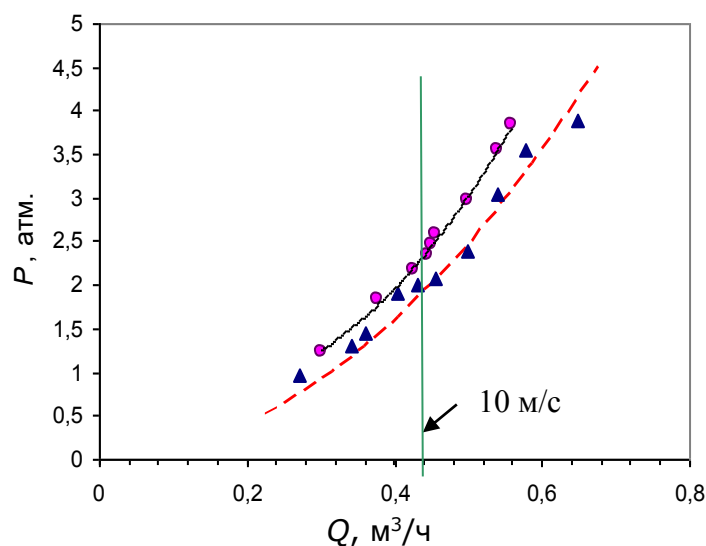


Рис.18. Зависимость давления P от расхода Q : измеренные на винтовой трубке (●) и прямой (▲). Сплошной линией показана квадратичная аппроксимация данных на винтовой трубке, пунктирной – расчет для прямой трубки.

На рис. 18 видно, что расчетные данные для прямой трубки хорошо согласуются с экспериментом. Также видно, что винтообразная форма канала охлаждения дает дополнительный перепад давления 0,4 атм. по сравнению с прямым каналом при скорости воды равной 10 м/с. Полученная зависимость позволяет рассчитать давление на входе в мишень, необходимое для обеспечения скорости 10 м/с. Так, при использовании 4 двухоборотных трубок, аналогично мишени со спиралевидными каналами, перепад давления на мишени составит 2,4 атм. при расходе 1,8 м³/ч.

Поскольку при использовании цельных медных трубок решается проблема деформации мишени, то становится возможным подача более высокого давления на каналы. При этом также возможно уменьшить расход воды в 2 раза, поскольку это приведет к допустимому возрастанию перепада температур с 8 °С до 16 °С. Такое решение реализуется использованием двух S-образных поворотов по центру мишени, позволяющих направить воду в обратную сторону по спирали. В результате необходимый перепад давления составит 5,3 атм. при расходе 0,9 м³/ч .

Заклучение

В настоящее время в Институте ядерной физики сооружается источник эпитепловых нейтронов на основе ускорителя для осуществления возможности проведения бор-нейтронозахватной терапии рака в условиях онкологической клиники. Одной из основных составляющих частей установки является мишень, генерирующая нейтроны в результате пороговой реакции ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$.

В работе проанализированы результаты ранее проведенных тепловых и гидравлических экспериментов с прототипами мишени с параллельными каналами. Предложена и изготовлена мишень со спиралевидными каналами, позволяющая уменьшить гидравлическое сопротивление течения воды и обеспечить необходимую скорость воды в охлаждающих каналах. Измерена зависимость перепада давления от расхода воды. Выяснено, что полученные результаты хорошо согласуются с расчетом с введенной дополнительной эмпирической поправкой. Определено, что данная конструкция мишени способна обеспечить необходимую эффективность теплосъема при использовании имеющейся системы охлаждения дистиллированной водой. Проведенные расчеты поглощенной дозы в фантоме для данной мишени показали чрезмерный поток γ -излучения и обозначили пути улучшения мишени с точки зрения спектра нейтронов. Предложена новая конструкция мишени в виде конуса с винтовыми каналами, способная не только обеспечить необходимый эффективный теплосъем, но и необходимый спектр нейтронов в режиме припороговой генерации. Проведены гидравлические эксперименты с моделью винтового канала.

Выражаю искреннюю благодарность моему научному руководителю Таскаеву Сергею Юрьевичу за помощь в подготовке этой работы, Баянову Борису Федоровичу и Желнову Леониду Владимировичу за содействие в проведении экспериментов, Тору Кобаяси за содействие в организации проведения расчетов поглощенной дозы и Жерарда Бенжуа за проведение этих расчетов.

Список литературы

1. *G.Locher*. Biological Effects and Therapeutic Possibilities of Neutrons, *Am. J. Roentgenol, Radium Ther.*, **36** (1936) 1.
2. *B. Bayanov, et al.* Accelerator based neutron source for the neutron-capture and fast neutron therapy at hospital, *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res., A* **413** (1998) 397-426.
3. Распыление твердых тел ионной бомбардировкой. *Под ред. Р. Бернша*. М., "Мир", 1986.
4. *М. Гусева, Ю. Мартыненко*. Радиационный блистеринг. *УФН* **135** (1981) 671.
5. *V. Belov, et al.* Neutron producing target for neutron capture therapy. Proc. 9th International Symposium on Neutron Capture Therapy for Cancer, October 2-6, 2000, Osaka, Japan, p. 253-254.
6. *V. Belov, et al.* Neutron producing target for accelerator based neutron source for NCT. *Research and Development in Neutron Capture Therapy*. Eds.: W. Sauerwein, R. Moss, and A. Wittig. *Monduzzi Editore*, 2002, p. 247-252.
7. *Б.Ф. Баянов, В.П. Белов, С.Ю. Таскаев*. Нейтроногенерирующая мишень ускорительного источника нейтронов для нейтронозахватной терапии. *ИЯФ* 2005-4
8. *Кононов О.Е., Кононов В.Н., Соловьев Н.А.* Источник нейтронов для борнейтронозахватной терапии на основе реакции ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$ вблизи порога. *Атомная энергия* **94** (2003) 469-472.
9. *И. Е. Идельчик*. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1975.
10. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Теоретическая физика: Учебное пособие. В 10 т. Т. VI. Гидродинамика. – 3 изд., перераб. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 736с.
11. *B. Bayanov, V. Belov, V. Kindyuk, E. Oparin, S. Taskaev*. Lithium neutron producing target for BINP accelerator-based neutron source. *Applied Radiation and Isotopes* **61** (2004) 817-821.